

## МЕТОДИКА ЛАЗЕРНОГО КАТОДОПОГЛОЩЕНИЯ

Арсеньев В. Г., Богданкевич О. В.,  
Зверев М. М., Копыт С. П., Кудяров Ю. А.

Описана новая методика, позволяющая исследовать изменение оптических свойств полупроводников под действием наносекундных импульсов ускоренных электронов. Сущность методики состоит в просвечивании полупроводникового соединения излучением широкополосного лазера на красителе при синхронном возбуждении кристалла электронами. Лазер на красителе возбуждался излучением многоэлементного полупроводникового лазера с накачкой электронным пучком. Экспериментальная апробация предлагаемой методики осуществлялась на соединении  $\text{CdS}_{0,6}\text{Se}_{0,4}$ .

При облучении полупроводниковых соединений пучком ускоренных электронов существенные изменения претерпевают функции распределения носителей заряда, что приводит к изменению оптических свойств полупроводника (ПП) и обуславливает ряд новых эффектов. В частности, при интенсивном возбуждении достигается инверсная населенность, на чем основан принцип работы ПП лазеров с электронной накачкой [1].

Как отмечалось в работе [2], исследование спектров поглощения ПП в момент облучения электронами (метод катодопоглощения) открывает новые возможности в спектроскопии твердого тела. В настоящее время отсутствует информация о спектрах катодопоглощения ПП соединений. В то же время подобного рода исследования необходимы как для понимания процессов, происходящих при возбуждении ПП электронным пучком, так и для оптимизации параметров ПП лазеров с электронной накачкой.

В настоящей работе описана новая методика, позволяющая получать и изучать динамику спектров катодопоглощения. Сущность методики состоит в просвечивании ПП соединения широкополосным импульсным лазером на кристалле при синхронном возбуждении ПП кристаллов ускоренными электронами. Экспериментальная апробация предлагаемой методики осуществлялась на ПП соединении  $\text{CdS}_{0,6}\text{Se}_{0,4}$ . Выбор материала связан с использованием данного соединения в ПП лазерах с накачкой ускоренными электронами [3].

Блок-схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Базовым элементом установки является ускоритель электронов, имеющий следующие параметры: ускоряющее напряжение 300 кэВ, энергия электронного пучка 16 Дж/имп, длительность импульса 20 нс. Ускоритель работал в режиме одиночных импульсов, электронный пучок выводился в атмосферу через бериллиевую фольгу. Часть электронного пучка использовалась для накачки многоэлементного ПП лазера на основе соединения  $\text{CdS}$  [4]. Неохлаждаемый ПП лазер с продольной накачкой возбуждался током электронов с плотностью 300 А/см<sup>2</sup>. Излучение многоэлементного ПП лазера (длина волны генерации 525 нм) осуществляло накачку широкополосного лазера на красителе «Родамин 6Ж» [5], излучение которого занимало спектральный диапазон 575—595. Энергия излучения лазера на красителе составляла 50 мкДж/имп. Излучение лазера на красителе использовалось в качестве зондирующего для получения спектров катодопоглощения ПП соединения  $\text{CdS}_{0,6}\text{Se}_{0,4}$ . Исследуемый образец представлял собой плоскопараллельную полированную пластину из блочного монокристалла. Пластина, площадь которой 1 см<sup>2</sup>, имела толщину 200 мкм,

что близко к глубине проникновения электронов с энергией 300 кэВ. Используемый образец находился при комнатной температуре и возбуждался электронным пучком с плотностью тока 250 А/см<sup>2</sup>. Широкополосное излучение лазера на красителе, прошедшее через исследуемый образец, подавалось на вход спектрометра ДФС-24, у которого был удален узел выходной щели. Спектральная линия, формирующаяся в плоскости выходной щели, проектировалась на вход скоростной электронно-оптической камеры «Агат-СФ», с помощью которой осуществлялась временная развертка спектра излучения лазера на красителе. Регистрация спектрохронограмм проводилась на фотопленку РФ-3. Степень почернения пленки в определенной точке спектрохронограммы содержит информацию о коэффициенте поглощения  $\kappa(\lambda, t)$  ПП соединения в данный момент времени  $t$  на выбранной длине волны  $\lambda$ . Интенсивность прошедшего через ПП света  $J(\lambda, t)$  с определенной длиной волны  $\lambda$  в момент времени  $t$  связана с коэффициентом поглощения  $\kappa(\lambda, t)$  известным соотношением

$$J(\lambda, t) = J_0(\lambda, t) \exp[-\kappa_r(\lambda, t) d], \quad (1)$$

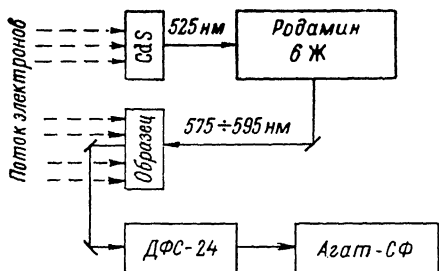


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки.

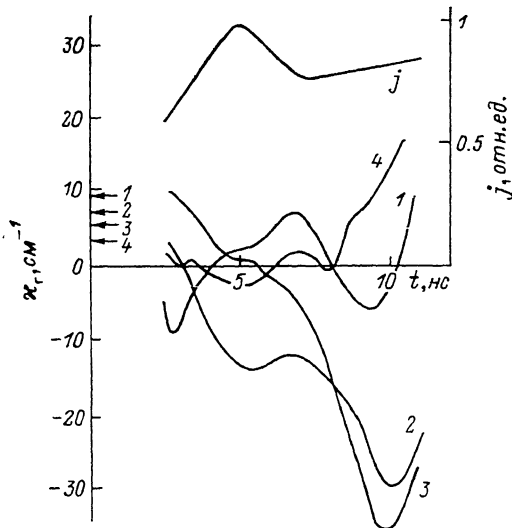


Рис. 2. Зависимость коэффициента поглощения и плотности тока от времени.

$\lambda$ , нм: 1 — 594, 2 — 595.5, 3 — 596.5, 4 — 598 нм.

где  $J_0(\lambda, t)$  — интенсивность света на входе в кристалл,  $d$  — толщина кристалла. Индекс «r» относится к случаю поглощения на «горячем» ПП кристалле, т. е. на кристалле, возбуждаемом пучком электронов. Коэффициент поглощения  $\kappa_r$  не однороден по толщине кристалла из-за неоднородности плотности энерговыделения при торможении возбуждающего пучка ускоренных электронов. Поэтому в формуле (1) под  $\kappa_r$  подразумевается усредненное по толщине кристалла значение коэффициента поглощения.

Для определения функции  $J_0(\lambda, t)$  осуществлялась регистрация спектрохронограммы импульса лазера на красителе, прошедшего через невозбужденный ПП, при этом часть электронного пучка, попадающая на исследуемый ПП, перекрывалась металлической пластиной. Параметры «холодной» (при отсутствии возбуждения ПП электронным пучком) спектрохронограммы  $J_x(\lambda, t)$  связаны с  $J_0(\lambda, t)$  выражением

$$J_x(\lambda, t) = J_0(\lambda, t) \exp[-\kappa_x(\lambda) d], \quad (2)$$

где  $\kappa_x(\lambda)$  — коэффициент поглощения «холодного» кристалла. Спектр поглощения  $\kappa_x(\lambda)$  исследуемого кристалла был получен на автоматизированном спектральном комплексе «КСВУ-23».

С учетом выражений (1) и (2) параметры возбужденного кристалла  $\kappa_r(\lambda, t)$  связаны с экспериментально полученными величинами  $J_r(\lambda, t)$ ,  $J_x(\lambda, t)$  и  $\kappa_x(\lambda)$  следующим образом:

$$\kappa_r(\lambda, t) = \kappa_x(\lambda) - (1/d) \ln [J_r(\lambda, t) / J_x(\lambda, t)]. \quad (3)$$

Следует отметить, что излучение лазера на красителе не должно вносить существенных изменений в оптические свойства кристалла. Это условие будет

выполнено, если плотность мощности зондирующего излучения будет меньше плотности мощности собственного излучения кристалла, а также не будет превышать порога нелинейного поглощения. В нашем случае нелинейность поглощения с точностью до нескольких процентов не наблюдалась вплоть до порога разрушения кристалла  $\approx 10$  МВт/см<sup>2</sup>. Плотность мощности собственного излучения при возбуждении электронным пучком превышала 1 МВт/см<sup>2</sup>, а плотность зондирующего составляла  $\approx 100$  кВт/см<sup>2</sup>. Направление распространения зондирующего излучения было перпендикулярно распространению собственного суперизлучения кристалла, что позволяло различать два вида излучения.

Некоторые возможности предлагаемой методики лазерного катодопоглощения представлены на рис. 2 и 3. На рис. 2 изображена зависимость коэффициента поглощения от времени для различных длин волн. На оси  $x_r$  сделаны отметки, соответствующие коэффициентам поглощения невозбужденного кристалла. На этом же рисунке показан характер временного изменения плотности тока электронов, возбуждающего исследуемый кристалл. Из рис. 2 видно, что под действием электронного пучка наблюдается существенное уменьшение коэффициента поглощения вплоть до отрицательных значений  $x_r$ , что соответствует усилению прошедшего света. Минимальное значение  $x_r$  наблюдается на длине волны 596.5 нм через 10 нс после начала облучения и имеет значение  $x_r =$

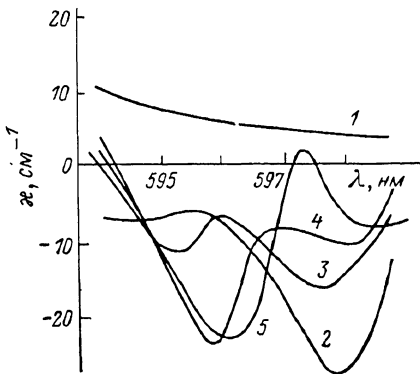


Рис. 3. Зависимость коэффициента поглощения от длины волны.  
1 —  $x_k$ , 2—5 —  $x_r$ ;  $t$ , нс: 2 — 2, 3 — 4, 4 — 6, 5 — 8.

$= -36$  см<sup>-1</sup>, что соответствует двукратному увеличению интенсивности света при прохождении света через активную ПП пластину. Просветление кристалла и усиление света связаны с изменением функции распределения носителей в зонах. Отметим, что рассматриваемый спектральный диапазон соответствует оптическим переходам между примесными «хвостами» валентной зоны и зоны проводимости. Существенной особенностью представленных зависимостей является отсутствие корреляции между формой импульса накачки и зависимостью коэффициента поглощения от времени. Так, в интервале  $t = 7-12$  нс происходит монотонное увеличение плотности тока, в то время как коэффициент поглощения имеет минимум (кривые 1—3) в диапазоне 9—10 нс. Это обстоятельство указывает на конкуренцию нескольких процессов, имеющих место при увеличении накачки. Увеличение плотности тока приводит к возрастанию концентрации электронов в зоне проводимости, что при неизменной ширине запрещенной зоны ведет к уменьшению  $x_r$ . Увеличение концентрации свободных носителей уменьшает ширину запрещенной зоны, что должно приводить к затемнению кристалла на определенной длине волны. По всей видимости, учет двух этих процессов позволит объяснить экспериментально наблюдаемую зависимость. Следует заметить, что на переднем фронте импульса накачки (0—5 нс) также наблюдается немонотонное поведение зависимостей. Однако, в связи с тем что зондирующий световой импульс подается на исследуемый кристалл с некоторой временной задержкой относительно импульса электронов, полная информация о поведении  $x_r$  на переднем фронте импульса отсутствует.

На рис. 3 показан участок спектров катодопоглощения, соответствующих разным моментам времени. В отличие от спектра поглощения на «холодном» кристалле (кривая 1) спектры катодопоглощения имеют ярко выраженную структуру, что можно объяснить наличием примесных уровней. Спектры, соответствующие разным моментам времени (кривые 2—4), имеют одинаковую форму и проявляют «красный» сдвиг с течением времени. Скорость «красного» смещения составила 0.25 нм/нс, что несколько меньше значения скорости, со-

ответствующей сужению межзонного энергетического интервала вследствие теплового нагрева ПП.

Представленные результаты указывают на возможность использования предлагаемой методики для получения спектров катодопоглощения и изучения их динамики.

#### Л и т е р а т у р а

- [1] Богданкевич О. В., Дарзек С. А., Елисеев П. Г. Полупроводниковые лазеры. М., 1976. 415 с.
- [2] Веселаго В. Г., Голант К. М., Шавлов А. В. — ЖЭТФ, 1984, т. 86, в. 5, с. 1759—1763.
- [3] Беляев С. А., Богданкевич О. В., Дарзек С. А., Зверев М. М., Певцов В. Ф., Ушахин В. А., Якушин В. К. — Квант. электрон., 1982, т. 9, в. 8, с. 1732—1733.
- [4] Богданкевич О. В., Зверев М. М., Костин Н. Н., Копыт С. П., Красавина Е. М., Крюкова И. В., Матвеевко Е. В., Певцов В. Ф., Якушин В. К. — Квант. электрон., 1985, т. 12, в. 7, с. 1517—1519.
- [5] Богданкевич О. В., Зверев М. М., Красавина Е. М., Крюкова И. В., Певцов В. Ф. — Квант. электрон., 1987, т. 14, в. 1, с. 218—220.

Всесоюзный  
научно-исследовательский центр  
по изучению свойств поверхности и вакуума  
Москва

Получена 29.10.1987  
Принята к печати 24.02.1988